

相 对 论 精 义

狭义、广义和宇宙学相对论

[美] W·仑德勒 著

江 山 译

方 励 之 校

安徽科学技术出版社

Wolfgang Rindler
ESSENTIAL RELATIVITY
Special, General, and Cosmological
Second Edition 1977

责任编辑：张晓红

封面设计：赵素萍

相对论精义
狭义、广义和宇宙学相对论

[美] W·仑德勒 著

江山 译

方励之 校

安徽科学技术出版社出版

(合肥市跃进路1号)

安徽省新华书店发行 安徽省科技印刷厂印刷

开本：850×1168 1/32 印张：11 字数：292,000

1986年3月第1版 1986年3月第1次印刷

印数：00,001—3,300

统一书号：13200·62 定价：3.15元

内 容 简 介

本书讲述相对论的各个领域，内容包括绝对空间的兴衰、爱因斯坦运动学和爱因斯坦光学、相对论和电动力学、广义相对论和宇宙学等。

本书的特点是始终强调对基本物理思想和概念的深入叙述，并含有大量近年来发表的新成果。为使读者建立起正确的空时背景，第一章就介绍了等效原理和马赫原理以及宇宙学的知识。重要公式的数学推导都伴随物理推理过程的叙述，读后能获得清晰的物理图景。书末附有精心选择的一百三十余道富有启发性的习题。

本书可供高等院校有关专业的高年级学生、研究生、教师、研究者以及对相对论和宇宙学有兴趣的广大读者阅读和参考。

JY1/155/12

第二版序言

回顾本书第一版，似乎只是一本书的纲要，现在的第二版，如果还算不上最后成品，至少也很接近成品了。书的目录看上去没有什么变化，这仅仅是因为原来对材料的组织是适宜的。本书基本目的未变，即从物理概念方面使相对论变得生动活泼。我十分同意理查德·库朗的名言，即“证明”应通过逐步推理、而不是靠计算来实现。必须进行计算时，我尽量使其简洁明了，以免掩盖推理的过程。

与第一版相比，本版增加了克鲁查空间、平面引力波和广义相对论的线性近似诸节。此外，还增添了一些习题，加了两个附录。其一是列出了对角度规的曲率分量，其二是把麦克斯韦理论综合表示为张量形式。贯穿全书都有许多重大的修订和补充：不少章节已完全重写，压缩了某些论证，加进了一些评论，还增加了最新研究成果。

.....

W·仑德勒

1977年2月，达拉斯

第一版序言

本书讲述相对性理论各个领域。它含有大量的新材料，并对传统的论证作了简化处理，即使经验丰富的教师使用本书也不会感到枯燥。狭义相对论、广义相对论和宇宙学的篇幅大体相同。全书宜于在一年内授完。若适当略去某些章节，亦可用作一学期的课程。我希望本书从内容到形式都能引起更多读者的兴趣，而不限于在校的大学生们。广义相对论（现代的引力理论，其中自由质点以“尽量直”的路径在弯曲空时中运动）和宇宙学（整个弯曲宇宙动力学），不仅是科学家为平衡对世界的认识所必需具备的知识，而且是现代物理学最高智慧的脉搏。但由于其专门性，往往被看作奢侈品而被排斥于大学课程之外。狭义相对论虽摆脱了这种命运，但成了一门实用性学科，讲授时往往不强调其中深刻的思想内容。如果学生从实际需要出发来学习这些课程，那么什么时候开始为好？虽然这些内容以其教学艰深而闻名，但大学生们还是可以接受的，即使广义相对论也不例外。学过偏微分、矢量微分、常用近似方法和二项式定理，就可以阅读本书。教学水平是在本书中逐步提高的，四维矢量在讲述狭义相对论时中途引入，并作为工具得到了充分应用。诚然，不用张量就无法对广义相对论有深刻的了解，它们在适当的地方（第八章）以尽可能自然的方式讲述。粗心的读者也许会把它遗漏，但渴望求知、善于思考的读者将会发现，本书所含的张量理论对理解全部相对论的张量论证已经够用。了解到张量和黎曼几何的作用，将会促使他们深入学习这一内容。

本书并未按传统的顺序叙述。除少数例外，传统的方法是在狭义相对论中接受牛顿惯性参照系，等效原理要到讲广义相对论时才加以介绍。因为牛顿惯性参照系并非狭义相对论所适合的参

照系，学生学到广义相对论时才突然发现他们一直是在错误的背景下学习狭义相对论的。当广义相对论、特别是等效原理还被人们怀疑的时候，这种做法可以谅解。今天，它们已被人们所承认，我们应当一开始就描绘一幅协调一致的世界图象。为了置狭义相对论于正确的背景之上，本书第一章就介绍了等效原理，而且有保留地介绍了马赫原理和宇宙学的某些知识。接下来几章是对狭义相对论严密的论述，始终强调基本的物理思想而不着重实验细节。然后是一章“易懂的”广义相对论，它叙述了不用张量能达到的极限。第八章是广义相对论的严密推演，是本书最困难的部分，初读时可把§8.4以后略去（但要把§8.10浏览一遍）。最后一章是宇宙学，严密而详尽，但比较好懂，对这一领域有兴趣的读者可单独阅读。书末附有精心选择的130余道习题，我奉劝即使最不求甚解的读者也不要把它完全忽视，全部解出这些习题是需要一些创造才能的，但只要把它细读一遍也就会受益不浅。大学生应当不间断地提高自己的创造能力，学会独立解决问题。最后提醒一下，某些章节使用了 $c=1$ 的单位制，与其它公式比较时别忘记这点。

.....

W·仑德勒

1969年，罗马

July 11/55/12

目 录

第一章 绝对空间的兴衰	(1)
§ 1.1 相对论的定义.....	(1)
§ 1.2 牛顿定律.....	(2)
§ 1.3 伽利略变换.....	(3)
§ 1.4 全部惯性参照系集合.....	(4)
§ 1.5 牛顿相对性.....	(4)
§ 1.6 牛顿绝对空间.....	(5)
§ 1.7 对牛顿绝对空间的反对意见.....	(5)
§ 1.8 麦克斯韦以太.....	(6)
§ 1.9 麦克斯韦以太在哪里.....	(7)
§ 1.10 洛仑兹以太理论.....	(8)
§ 1.11 相对性原理.....	(9)
§ 1.12 对相对性原理的论证.....	(10)
§ 1.13 麦克斯韦相对性.....	(11)
§ 1.14 广义相对论的起源.....	(12)
§ 1.15 马赫原理.....	(13)
§ 1.16 马赫原理的推论.....	(14)
§ 1.17 宇宙学.....	(18)
§ 1.18 惯性质量和引力质量.....	(19)
§ 1.19 等效原理.....	(21)
§ 1.20 半强等效原理.....	(24)
§ 1.21 等效原理的推论.....	(26)
第二章 爱因斯坦运动学	(29)

§ 2.1	狭义相对论的基本特征	(29)
§ 2.2	关于物理定律的性质	(32)
§ 2.3	对相对性进行论证的原型	(33)
§ 2.4	同时的相对性	(34)
§ 2.5	坐标格	(36)
§ 2.6	洛仑兹变换	(38)
§ 2.7	洛仑兹变换的性质	(41)
§ 2.8	洛仑兹变换的双曲函数形式	(46)
§ 2.9	洛仑兹变换的图示	(47)
§ 2.10	世界图象和世界映射	(50)
§ 2.11	长度收缩	(50)
§ 2.12	长度收缩佯谬	(52)
§ 2.13	时间膨胀	(54)
§ 2.14	孪生子佯谬	(56)
§ 2.15	速度变换	(59)
§ 2.16	固有加速度	(62)
§ 2.17	不用第二公设的狭义相对论	(64)
第三章	爱因斯坦光学	(68)
§ 3.1	曳引效应	(68)
§ 3.2	多普勒效应	(69)
§ 3.3	光行差和运动物体的视形状	(72)
第四章	空时和四维矢量	(76)
§ 4.1	空时	(76)
§ 4.2	三维矢量	(78)
§ 4.3	四维矢量	(82)
§ 4.4	四维张量	(85)
§ 4.5	三维闵可夫斯基图	(87)
§ 4.6	波的运动	(90)
第五章	相对论质点力学	(93)
§ 5.1	牛顿定律充分有效的范围	(98)

§ 5.2	为什么万有引力不能自然地纳入狭义相对论	(94)
§ 5.3	相对论惯性质量.....	(96)
§ 5.4	相对论力学的四维矢量公式描述.....	(98)
§ 5.5	关于伽利略四维矢量的说明.....	(100)
§ 5.6	质量和能量的等价性.....	(101)
§ 5.7	动量中心参照系.....	(104)
§ 5.8	相对论台球.....	(106)
§ 5.9	能量阈值.....	(107)
§ 5.10	三维力和四维力.....	(109)
§ 5.11	德布罗意波.....	(112)
§ 5.12	光子和康普顿效应.....	(114)
§ 5.13	尘埃的能量张量.....	(115)
第六章	相对论和电动力学	(119)
§ 6.1	场矢量的变换.....	(119)
§ 6.2	带电质点的磁偏转.....	(123)
§ 6.3	均匀运动电荷的场.....	(124)
§ 6.4	无限长直电流的场.....	(127)
第七章	广义相对论的基本思想	(130)
§ 7.1	曲面.....	(130)
§ 7.2	高维弯曲空间.....	(133)
§ 7.3	黎曼空间.....	(136)
§ 7.4	关于广义相对论的一种方案.....	(140)
§ 7.5	引力多普勒效应.....	(144)
§ 7.6	静场的度规.....	(146)
§ 7.7	静场中的测地线.....	(150)
第八章	广义相对论的正式推演	(155)
§ 8.1	广义相对论中的张量.....	(155)
§ 8.2	广义相对论的真空场方程.....	(165)
§ 8.3	史瓦西解.....	(168)

§ 8.4	史瓦西空间的光线和轨道	(175)
§ 8.5	史瓦西视界、引力坍缩和黑洞	(183)
§ 8.6	克鲁查空间和均匀加速度场	(191)
§ 8.7	公式 $E = mc^2$ 的广义相对论“证明”	(200)
§ 8.8	平面波前引力波	(202)
§ 8.9	弯曲空时中的物理定律	(210)
§ 8.10	有物质时的场方程	(215)
§ 8.11	从修改后的史瓦西空间到德西特空间	(222)
§ 8.12	广义相对论的线性近似	(228)
第九章	宇宙学	(235)
§ 9.1	基本事实	(235)
§ 9.2	前相对论宇宙学的明显困难	(242)
§ 9.3	宇宙学相对论：宇宙学原理	(245)
§ 9.4	米尔恩模型	(248)
§ 9.5	罗伯逊-沃尔克度规	(252)
§ 9.6	橡皮模型、红移和视界	(258)
§ 9.7	与观察结果的比较	(265)
§ 9.8	与伪牛顿理论对应的宇宙动力学	(270)
§ 9.9	与广义相对论对应的宇宙动力学	(274)
§ 9.10	弗利德曼模型	(279)
§ 9.11	再次与观察结果比较	(288)
§ 9.12	对马赫原理的再考察	(294)
附录一	对角度规的曲率张量分量	(297)
附录二	怎样“创造”麦克斯韦理论	(299)
习题	(303)
名词索引	(334)

第一章 绝对空间的兴衰

§ 1.1 相对论的定义

物理学中的相对论，原意是指对绝对空间的摒弃。现在，它是指爱因斯坦下列两个著名理论中的任何一个：1905年的狭义相对论和1915年的广义相对论。狭义相对论摒弃了在麦克斯韦理论中起着“以太”作用的绝对空间（以太是作为光波和一般电磁场的载体）；广义相对论则又摒弃了在牛顿理论中作为无加速度判据的绝对空间。（爱因斯坦理论还摒弃了绝对时间的概念，这虽不是理论原来的目的，但也许更加重要，将在下章讨论。）由于这些思想带有根本的性质，本章将围绕以下三个问题作简短的讨论：什么是绝对空间？为何应将它摒弃？怎样才能摒弃？

相对性更富有建设性的近代定义，是后来从现行的相对性理论中引伸出来的。按照这种见解，任何物理理论的相对性都以使这个理论的定律保持不变的变换群来标志，因而该变换群描述某种对称性，例如描述这个理论所涉及的空间和时间范围的对称性。这样，正如我们将要看到的，牛顿力学具有所谓伽利略群的相对性，狭义相对论具有彭加勒群（或“广义”洛仑兹群）的相对性，广义相对论具有光滑的、一一对应的完全变换群的相对性。各种宇宙论赋予大尺度宇宙以各种不同的对称性，因而就具有这些对称性的相对性。即使某理论仅在绝对欧几里德空间里成立，但只要此空间在物理上是均匀的和各向同性的，它就具有转动和平动群的相对性。

§ 1.2 牛顿定律

我们回忆牛顿力学三定律，其中第一定律（伽利略定律）实际上是第二定律的特殊情况：

- (i) 自由质点的运动，具有恒定的速度矢量，即加速度为零。或者说，是以恒定的速率沿直线运动。
- (ii) 作用在质点上的力矢量等于质点的质量与加速度矢量的乘积： $f = ma$ （这并不仅仅是力的定义，因为还有一些独立的定律能决定力，如胡克定律、库仑定律，当然还有牛顿第三定律）。
- (iii) 作用力和反作用力大小相等而方向相反。就是说，若一质点 A 对质点 B 施力 f ，则质点 B 对质点 A 施力 $-f$ 。（如果这种作用是超距的，这定律就隐含着对绝对时间、即同时的绝对性的假定）。

物理定律通常是相对某个参照系来陈述的。相对于这参照系，我们来定义速度、加速度等物理量。在所有参照系中优先选取的是刚性参照系，在刚性参照系中优先选取的是惯性参照系。牛顿定律适用于惯性参照系。

经典的刚性参照系，是把刚体想象地加以延伸而成的。例如，地球决定一个遍及整个空间的刚性参照系，这空间包括相对于地球以及相互之间保持“刚性”静止的所有的点。在参照系中选择三个互相垂直的平面，用 x 、 y 、 z 分别量度到这些平面的距离，可以有许多方法把这样的笛卡儿直角坐标系 S 和这个参照系连接起来。此外还必须定义一个时间坐标 t ，使这坐标系能对时间进行编序。具有这些坐标的刚性参照系，称为笛卡儿参照系。以上叙述的先决条件是此参照系中的几何学为欧几里德几何学，这一点直到1915年都被认为是不成问题的。

牛顿第一定律起着把惯性参照系从刚性参照系中挑拣出来的作用；若自由质点相对于某刚性参照系的运动没有加速度，则此

参照系就是惯性参照系。然而，由于质点都受万有引力的作用，在大质量物体附近没有一个质点是“自由的”（即不受力的），所以参照系中，只有那些“距一切有引力作用的物质足够远”的区域才能应用这个均匀运动的判据。

根据经验，很久以来就认为“恒星”参照系是非常精确的惯性参照系，因而用作牛顿定律的基本参照系。现在已知，银河系在旋转，宇宙在膨胀，所以我们可以用下述刚性参照系来代替“恒星”参照系：在此参照系中，所有其它星系对我们沿径向后退，亦即此参照系相对于遥远的宇宙是对称的。以后我们谈到的“恒星”参照系，指的就是这个意思。

§ 1.3 伽利略变换

设两笛卡儿参照系 $S(x, y, z, t)$ 和 $S'(x', y', z', t')$ 作“标准配置”，如图1.1所示。 S' 以匀速 v 沿 S 的 x 方向运动。两坐标系对应的坐标轴在运动中始终保持平行。当 $t = t' = 0$ 时，这些轴互相重合。现假定在这两参照系中采用相同的距离和时间单位，例如时钟可以由两参照系中铯原子的振动来同步，尺子可以由某一约定的光谱线的波长来校准，这波长可用干涉的方法测定。假定某事件（如灯泡的闪光或两质点的碰撞）在 S 中的坐标为 (x, y, z, t) ，在 S' 中的坐标为 (x', y', z', t') ，则这两组坐标间经典的（以及“常识的”）关系由下列标准伽利略变

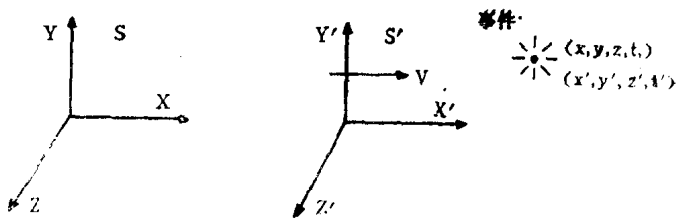


图 1.1

换给出:

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t. \quad (1.1)$$

vt 为两坐标系空间原点间的距离。通常把最后一式看成是理所当然的, 它表示时间的普遍性或绝对性。

将式 (1.1) 对 $t=t'$ 求导, 立即得到经典的速度变换, 它把 S 和 S' 中运动质点的速度分量联系起来, 即

$$u'_1 = u_1 - v, \quad u'_2 = u_2, \quad u'_3 = u_3. \quad (1.2)$$

式中 $(u_1, u_2, u_3) = (dx/dt, dy/dt, dz/dt)$, $(u'_1, u'_2, u'_3) = (dx'/dt', dy'/dt', dz'/dt')$ 。因此, 如果你在速率为 30 英里/小时(v)的公共汽车上以 2 英里/小时(u'_1) 的速率向前走, 则你相对于公路的速率为 32 英里/小时(u_1)。在相对论中这一关系就不再正确了。

§ 1.4 全部惯性参照系集合

若图 1.1 中 S 是惯性参照系, 则 S' 也是惯性参照系, 因为 S 中自由质点运动的线性方程组经式 (1.1) 变换为 S' 中类似的线性方程组, 而若自由质点相对于某一笛卡儿参照系的运动方程是线性的, 则此参照系就是惯性参照系。反之, 任一惯性参照系必相对于其它惯性参照系作“均匀”运动 (即具有恒定的速度矢量且不存在转动), 因为不均匀运动使得牛顿第一定律不可能同时在两个参照系中成立。因此, 全部惯性参照系就是由基本的恒星参照系加上相对于它作均匀运动的一切其它参照系所组成。按照牛顿的观点, 所有这些惯性参照系都具有无限的空间和时间范围, 即 x 、 y 、 z 、 t 的范围都是从负无穷到正无穷。

§ 1.5 牛顿相对性

不仅牛顿第一定律, 而且牛顿第二和第三定律在一切惯性系

中均成立。在牛顿理论中，惯性参照系中 f 和 m 的不变性乃是公理（经验至少近似地证实了这一点）。在伽利略变换中， a 可认为不变，所以在一切惯性参照系中以这三个定律为基础的力学是完全相同的。牛顿和在他之前的伽利略一样，用大家熟知的轮船上的例子来解释这一事实：无论轮船是静止或是作均匀运动，其中所有的运动和所有的力学现象都以相同的方式发生。牛顿力学的这种性质通常称为牛顿相对性（或伽利略相对性）。

§ 1.6 牛顿绝对空间

由于这种“相对性”，一惯性参照系相对于另一惯性参照系的均匀运动不能用在它内部进行的、服从牛顿理论的力学实验来测定，但加速度是绝对的。你可以怀疑你乘的船是已经航行或仍停泊在码头上，但不会怀疑它是否撞在冰山上。按照牛顿的观点，质点不反抗无论多大速率的均匀运动，但反抗它速度的任何变化，即反抗正的或负的加速度。牛顿第二定律对此作了准确的描述。公式 $f = ma$ 的系数 m 是质点惯性的量度，即对加速度反抗程度的量度。现在有必要提出以下问题：加速度是相对什么而言的呢？答案很简单：它是相对于任一惯性参照系的。但无论从物理上或美学上看，这样的回答的确不能令人满意。牛顿也完全注意到这一点。世界上什么东西能把惯性参照系从其余参照系中挑拣出来作为无加速度的判据呢？牛顿找不到答案，他又假定存在一个绝对空间，并假设它与每个质点相互作用以反抗质点的加速。牛顿选择太阳系质心参照系，并把它看成绝对空间。他的后继者则把恒星参照系看成绝对空间。但从逻辑上讲，把任一惯性参照系看成是绝对空间都一样。

§ 1.7 对牛顿绝对空间的反对意见

对牛顿绝对空间的概念提出批评的从来不乏其人。从惠更

斯、莱布尼兹以及与牛顿几乎同时代的贝克莱主教，到十九世纪的恩斯特·马赫和二十世纪的爱因斯坦，都对绝对空间提出过有力的反对意见：

- (i) 绝对空间纯粹是一种特别规定，并没有解释任何问题。它类似早期开普勒所说行星沿轨道的运动是由于天使的推动，或者类似夏马用“鬼怪”在金属中奇妙的运动来解释直至不久前还是个谜的超导性。
- (ii) 没有办法在无穷多个惯性参照系中唯一地确定牛顿绝对空间的位置。
- (iii) “设想一件东西——绝对空间，能作用于其它物体，却不能被其它物体所作用，这是与人们的科学常识相抵触的。”这是爱因斯坦说的一句话，他把这一思想归于马赫。这或许是所有反对意见中最强有力的一个。它不仅对绝对空间（没有它，牛顿理论也能成立）而且对整个惯性参照系集合提出了疑问。

但事实表明惯性参照系是非常真实的。它们在牛顿理论中，并确实我们的经验中起着核心作用。对于它们的存在，牛顿理论不能提供令人满意的解释。如果我们把注意力集中于悬挂在公共轴线上的两个弹性球上，让其中一个旋转而鼓起来，另一个保持静止而不发生形变，这两个球怎样“知道”它们当中哪一个在旋转而必然鼓起，要弄清这点是很困难的。

§ 1.8 麦克斯韦以太

曾经有个时期，麦克斯韦“以太”似乎可以和绝对空间等同起来，从而对上述各种反对意见提供一种解答。众所周知，在麦克斯韦理论中出现了具有速率量纲的常数 c ，最初定义它为电量的静电单位和电磁单位的比值，可以用含有电荷和电流的简单实验来测定。麦克斯韦预言，真空中电磁扰动的传播就具有这一速率 c ，或者说，存在着电磁波。令人惊奇的是， c 精确地与光在

真空中的速率相同，这立刻引导麦克斯韦推测光必定是一种电磁波动现象。（那时物理学的其它部分尚未出现“ c ”，如果麦克斯韦把光归结为引力波，那将是他的不幸！）麦克斯韦复活了关于“以太”的古老思想，把它当作电磁波和一般电磁“应变”的载体。假设“静止以太”参照系和“恒星”参照系重合，看起来似乎是合理的。

§ 1.9 麦克斯韦以太在哪里

约自1860年以来，麦克斯韦理论的巨大成就极大地促进了寻找直接证实以太存在的实验。特别是希望测出地球的“以太漂移”，即测出地球绕日运行时在以太中穿行的速度。这些实验中最著名的是迈克耳逊和莫雷的实验（1887年）。他们让光源发出的光信号的一部分沿着假定的以太漂移方向而另一部分沿着与上述垂直的方向射向平面镜，再使它们折回，试图用这种精巧的干涉方法测出这两个方向上的时间差。由大家所熟悉的在河水中游泳的例子，可以使这个实验的原理更加明白：来回横渡一条河所需的时间比沿河流方向来回游同样的距离所需的时间要短些（见习题1.1, 1.2）。迈克耳逊和莫雷没有测到任何时间差。不论以太怎样流经太阳系，由于地球的轨道速率为18英里/秒，可以期待在一年中的某个时候，以太漂移至少有这样大的速率，而这么快的以太漂移完全能够被测量仪器测出。后来还有许多同样精巧的实验也都因为找不到任何以太漂移而完全失败。根据观察到的星光的光行差，可以排除那种认为地球将其附近的以太完全“曳引”着一起运动的简单解释。事情愈来愈清楚，麦克斯韦以太无论在解释已观察到的现象或预言新现象方面都和开普勒的天使同样“无用”。

另外，电磁理论还遇到一个难解的谜：无论一个人怎样“追赶”光波，显然，他不能改变光对于他的速率。从经典运动学的观点来看，这是不可思议的。